

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRONOMICAS  
SECCIÓN DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA**



**INFORME FINAL DEL CURSO DE ESPECIALIZACIÓN:  
CURSO DE ESPECIALIZADO EN MANEJO DE CULTIVOS HIDROPÓNICOS EN  
INVERNADERO.**

**TÍTULO DEL INFORME FINAL:  
RECICLAJE Y TRATAMIENTO DE LAS SOLUCIONES NUTRITIVAS EN HIDROPONIA.**

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**PRESENTADO POR:  
MARIA CONCEPCION LOVO DIAZ N° CARNET LD18009  
DIEGO RODRIGO ROMERO PORTILLO N° CARNET RP20027**

**DOCENTE ASESOR:  
ING. AGR. CARLOS LUIS ZELAYA FLORES.**

01 DE OCTUBRE DE 2025  
SAN MIGUEL, EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**AUTORIDADES**



M.SC. JUAN ROSA QUINTANILLA.

**RECTOR**

DRA. EVELYN BEATRIZ FARFÁN

**VICERRECTORA ACADÉMICA**

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**VICERRECTOR ADMINISTRATIVO**

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

**SECRETARIO GENERAL**

LIC. CARLOS AMÍLCAR SERRANO RIVERA

**FISCAL GENERAL**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**  
**AUTORIDADES**



**MSC. CARLOS IVÁN HERNÁNDEZ FRANCO**  
**DECANO**

**DRA. NORMA AZUCENA FLORES RETANA**  
**VICEDECANA**

**LIC. CARLOS DE JESÚS SANCHEZ**  
**SECRETARIO**

**MSC. EVER ANTONIO PADILLA LAZO**  
**DIRECTOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN**

**ING.AGRO. MARCO VINICIO CALDERÓN CASTELLANOS**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRÓNOMICAS**

**ING.AGR. CARLOS LUIS ZELAYA FLORES**  
**DOCENTE DIRECTOR**

**ING. AGR.JAIME CRISTOBAL RIOS MOLINA.**  
**COORDINADOR DE PROCESOS DE GRADUACIÓN**

## RECICLAJE Y TRATAMIENTO DE LAS SOLUCIONES NUTRITIVAS EN HIDROPONIA.

**Resumen:** La hidroponía constituye una alternativa productiva frente a la degradación de suelos y la escasez hídrica en El Salvador. Este estudio analiza el reciclaje y tratamiento de soluciones nutritivas en sistemas hidropónicos, considerando sus beneficios, limitaciones y potencial de implementación en el contexto nacional. Se revisaron fuentes científicas y experiencias locales, destacando que el reciclaje de soluciones nutritivas optimiza el uso del agua, reduce costos de fertilización y mejora la sostenibilidad agrícola. Se identifican limitaciones relacionadas con la falta de capacitación técnica y la inversión inicial, pero se concluye que su aplicación puede fortalecer la seguridad alimentaria y la innovación agro-productiva en el país.

**Palabras clave:** hidroponía, El Salvador, soluciones nutritivas, reciclaje, sostenibilidad.

**Abstract:** Hydroponics represents a productive alternative to soil degradation and water scarcity in El Salvador. This study analyzes the recycling and treatment of nutrient solutions in hydroponic systems, considering their benefits, limitations, and potential implementation in the national context. Scientific sources and local experiences were reviewed, highlighting that nutrient solution recycling optimizes water use, reduces fertilization costs, and improves agricultural sustainability. Limitations related to technical training and initial investment were

identified, but it is concluded that its application can strengthen food security and agro-productive innovation in the country.

**Keywords:** hydroponics, El Salvador, nutrient solutions, recycling, sustainability.

### INTRODUCCION.

El Salvador enfrenta desafíos significativos en su sector agrícola debido a la creciente presión sobre los recursos naturales, la degradación de suelos, la variabilidad climática y la escasez de agua. La hidroponía surge como una alternativa sostenible que permite producir alimentos sin necesidad de suelos fértiles y con un uso eficiente de los recursos.

Un aspecto central en este tipo de producción es la gestión de las soluciones nutritivas, debido a la disposición inadecuada puede generar contaminación ambiental, mientras que su reciclaje y tratamiento representan una estrategia para reducir costos, aprovechar nutrientes y reducir impactos ambientales.

El presente artículo tiene como objetivo analizar los métodos de reciclaje y tratamiento de soluciones nutritivas en sistemas de cultivos hidropónicos, con énfasis en su aplicación en El Salvador como mecanismo de sostenibilidad agrícola.

Identificando las oportunidades que ofrece la hidroponía recirculante para maximizar los

beneficios ambientales y económicos en la reutilización de soluciones nutritivas que favorezcan su adopción a nivel nacional.

## **MARCO TEÓRICO.**

### **Fundamentos de las soluciones nutritivas en hidroponía.**

Las soluciones nutritivas son mezclas acuosas que contienen macro y micronutrientes en formas iónicas disponibles para la planta. Su composición y características fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica —CE— y relaciones catión-anión) determinan la disponibilidad de nutrientes y la salud de las raíces. El manejo correcto exige análisis del agua de origen, control constante de pH y CE, y ajuste según la tasa de absorción del cultivo. En sistemas de recirculación, la composición cambia con el tiempo por la absorción selectiva de elementos y por aportes de exudados radiculares y microorganismos.

### **Tipos de sistemas hidropónicos y su relación con el reciclaje.**

Sistemas de flujo y refluo (ebb and flow) y NFT (nutrient film technique): comúnmente permiten recirculación directa de la solución; requieren filtración y monitoreo frecuente para evitar obstrucción y proliferación microbiana.

**Sistemas abiertos** (drip, fertirrigación abierta): la descarga frecuente hace difícil el reciclaje sin tratamiento.

Sistemas cerrados (recirculación completa, aeroponía cerrada): diseñados para mínimo consumo de agua y nutrientes; son los más aptos para aplicación de estrategias de reciclaje, aunque demandan mayor control técnico.

### **Beneficios agronómicos, económicos y ambientales del reciclaje.**

El reciclaje reduce el volumen de agua dulce requerido y el uso de fertilizantes, disminuye costos operativos y la carga contaminante en efluentes agrícolas. También contribuye a la viabilidad de producción en zonas con agua limitada o costosa. No obstante, la recirculación sin un manejo adecuado puede originar desequilibrios iónicos, deficiencias específicas (aunque el CE se mantenga), acumulación de sodio u otros iones poco absorbidos y acumulación de exudados o fitotóxicos que afectan el rendimiento. Por ello, la recirculación exige monitoreo puntual de nutrientes individuales, pH y parámetros microbiológicos.

## **PRINCIPALES TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y RECICLAJE.**

### **Filtración y pretratamiento físico.**

Filtración mecánica (mallas, filtros de arena, filtros de cartucho): elimina partículas y raíces sueltas que obstruyen sistemas. Bajo costo, mantenimiento periódico necesario.

Microfiltración / ultrafiltración: retienen materia orgánica y microorganismos; mayor costo.

### **Tratamientos fisicoquímicos.**

Ósmosis inversa (OI): remueve sales, metales, y materia orgánica disuelta, permitiendo la obtención de agua casi pura para formular una nueva solución. Es muy efectiva, pero genera una corriente de rechazo (brine) que exige gestión y tiene costos energéticos y de inversión elevados. Su uso es adecuado cuando la calidad del agua original es mala o se requiere eliminar acumulación salina.

Precipitación química y coagulación: pueden recuperar ciertos nutrientes (p. ej., fósforo) en forma de precipitados (fosfatos) para reutilización, o reducir DQO antes de vertido.

Intercambio iónico y resinas selectivas: permiten recuperar o eliminar iones específicos (p. ej., nitratos, potasio, sodio), adecuados para ajuste fino de la composición iónica.

### **TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS Y BASADOS EN ORGANISMOS FOTOSINTÉTICOS.**

Cultivo de microalgas: las microalgas consumen nitrógeno y fósforo, biomasa resultante puede valorizarse (fertilizante, alimentación animal). El proceso también mejora calidad microbiológica del agua. Limitaciones: control de especies, espacio y luz, continuación de nutrientes residuales.

Biorreactores y biopelículas (desnitrificación, nitrificación controlada): permiten transformar N orgánico y amoniacal en formas menos problemáticas o capturar nitrógeno para recuperación.

Humedales construidos y wetlands artificiales: económicos y eficaces en la remoción de nutrientes a nivel rural o comunitario; requieren superficie y tiempo de retención.

### **Procesos avanzados de oxidación y desinfección.**

UV, ozono y combinación UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: eliminan patógenos y degradan compuestos orgánicos y exudados; útiles para controlar proliferación microbiana en circuitos recirculantes. La combinación con filtración mejora eficiencia.

### **Sistemas integrados y enfoques híbridos.**

La tendencia actual favorece soluciones integradas: pre-filtrado → tratamiento biológico (microalgas o biorreactor) → desinfección UV → ajuste final mediante intercambio iónico u OI para corregir CE/pH y reformulación nutritiva. Estudios recientes proponen enfoques con extracción de nutrientes por bioadsorbentes y recuperación de P y N para reintroducirlos como fertilizantes.

### **Riesgos y desafíos técnicos del reciclaje.**

Acumulación iónica y desequilibrio: el mantenimiento del EC no garantiza la presencia adecuada de cada nutriente; la

diferencia entre consumo de iones puede crear deficiencias.

Fitotoxicidad por exudados radiculares y compuestos orgánicos: puede reducir crecimiento y provocar problemas de calidad.

Proliferación microbiana y enfermedades: la recirculación favorece el establecimiento de patógenos si no hay desinfección adecuada.

Generación de corrientes de rechazo y residuos del tratamiento: procesos como OI producen brine que debe gestionarse; tratamientos químicos generan lodos.

Costos y capacidad técnica: tecnologías avanzadas tienen barreras de acceso en pequeños productores; se requiere capacitación y mantenimiento.

### **Experiencias y contexto en El Salvador.**

En El Salvador, el uso de hidroponía y acuaponía ha crecido en proyectos de innovación agrícola y programas de apoyo público y privado (p. ej., iniciativas del Ministerio de Agricultura y Ganadería para promover sistemas acuapónicos en comunidades). La literatura local (repositorios universitarios) muestra experiencias en la implementación de soluciones nutritivas adaptadas a recursos locales, incluyendo formulaciones y manejo de agua. Sin embargo, la investigación aplicada sobre tratamiento y reciclaje específico de efluentes hidropónicos en contexto salvadoreño sigue

siendo limitada y se beneficia de adaptar tecnologías de bajo costo (humedales construidos, filtración simple, microalgas) junto a buenas prácticas de manejo (monitoreo de pH/CE, rotación de soluciones, limpieza y desinfección).

### **Ministerio de Agricultura y Ganadería.**

#### **Criterios para seleccionar tecnologías apropiadas (aplicable a El Salvador).**

Escala de la unidad productiva: pequeños productores → soluciones de bajo costo (filtración, humedales, microalgas); grandes invernaderos → sistemas híbridos con OI o intercambio iónico.

Disponibilidad de agua y calidad: aguas con alta salinidad pueden requerir OI o mezcla con aguas más aptas.

Capacidad técnica y mantenimiento: preferir tecnologías con operación y mantenimiento que los productores locales puedan asumir.

Valoración económica y ciclo de vida: considerar no solo inversión inicial, sino costos energéticos y la gestión de subproductos.

Marco regulatorio y medioambiental: asegurar cumplimiento con normas locales de vertido y promover políticas de incentivo a prácticas sostenibles.

#### **Modelos de gestión operativa para reciclaje en producción hortícola.**

Se propone un protocolo operativo mínimo para un invernadero hidropónico con recirculación en El Salvador:

Instalación de filtro mecánico y tamiz a la salida de la línea de cultivo.

Depósito de reserva con sedimentación y capacidad para mezcla.

Unidad de tratamiento biológico (microalgas o lecho de macrófitas) para recuperación parcial de N y P.

Desinfección por UV y ajuste final de nutrientes (según análisis de iones).

Monitoreo semanal de pH, CE y análisis mensual de nutrientes clave (N, P, K, Ca, Mg, Na).

Registro de cultivos y rotación de soluciones (renovación total programada si indicadores muestran desequilibrios).

Este esquema busca balancear eficiencia y factibilidad técnica/económica.

## **CONCLUSIONES.**

El reciclaje y tratamiento de soluciones nutritivas es una estrategia viable y necesaria para aumentar la sostenibilidad de la hidroponía, especialmente en contextos con recursos hídricos limitados como El Salvador. La recirculación permite reducciones significativas en consumo de agua y fertilizantes, mejora la eficiencia productiva y disminuye la carga de nutrientes vertida al

medio ambiente cuando se implementa correctamente (mediante control y tratamiento adecuados).

No existe una solución única: la elección de tecnologías debe basarse en la escala productiva, la disponibilidad de inversión, la calidad del agua de origen y la capacidad técnica de los operadores. Para pequeños productores y proyectos comunitarios en El Salvador, las soluciones de bajo costo (filtración mecánica, humedales construidos, cultivo de microalgas y desinfección UV a pequeña escala) presentan la mejor relación costo-beneficio. Para instalaciones comerciales de mayor escala, los sistemas híbridos que integren OI, intercambio iónico y procesos biológicos ofrecen mayor control sobre la composición final de la solución, aunque con mayores costos y demandas energéticas.

## **Riesgos técnicos y agronómicos requieren manejo especializado:**

la recirculación sin análisis de nutrientes individuales puede provocar deficiencias o toxicidades incluso cuando el EC se mantiene en un rango objetivo; además, la acumulación de exudados y la presencia de patógenos son desafíos reales. Por tanto, el monitoreo (pH, CE, N-P-K, Ca-Mg-Na, conteo microbiano en caso de brotes) y protocolos de limpieza/desinfección son indispensables para evitar pérdidas productivas.

**Oportunidades de valorización de subproductos:** tecnologías como el cultivo de microalgas o la precipitación de fosfatos permiten recuperar nutrientes y generar productos de valor agregado (biomasa algal como fertilizante o insumo), lo cual puede mejorar la economía de la operación y cerrar ciclos de nutrientes a nivel local. Sin embargo, su implementación exige evaluación de mercado y adaptación técnica.

### **Recomendaciones para el contexto salvadoreño.**

- Promover proyectos demostrativos a escala regional que integren tecnologías adecuadas (humedales construidos, módulos de microalgas, filtros y UV) para validar su desempeño en condiciones locales.
- Capacitar a productores sobre análisis de agua, interpretación de CE/pH y manejo de desequilibrios iónicos; incluir módulos en universidades y centros técnicos.
- Incentivar lineamientos y normativas que regulen la descarga de efluentes hidropónicos y ofrezcan incentivos para adopción de sistemas recirculantes.
- Fomentar la investigación local sobre recuperación de nutrientes y adaptación de tecnologías de bajo costo, incluyendo la evaluación de ciclo de vida y costos energéticos.

- Estudios longitudinales en El Salvador que comparen sistemas tratados (microalgas, humedales, OI) en términos de rendimiento de cultivo, calidad de producto y huella de recursos.
- Evaluaciones económicas que consideren costos de inversión y operación, así como potenciales ingresos por subproductos.
- Desarrollo de protocolos simplificados de monitoreo para pequeños productores (kits de medición y guías prácticas).

En síntesis, el reciclaje y tratamiento de soluciones nutritivas ofrecen un camino sólido hacia hidroponía más sostenible en El Salvador; su éxito dependerá de la selección tecnológica adecuada, la capacitación de productores y el apoyo institucional para escalar soluciones efectivas.

### **REFERENCIAS:**

Asaduzzaman, M. (2022). *Editorial: Nutrients recycling in hydroponics: Opportunities and challenges toward sustainable crop production under controlled environment agriculture*. Frontiers.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8964292/> [PMC](#)

Fathidarehnijeh, E., & otros. (2023). *Current perspective on nutrient solution management*

*in hydroponics: A review*. Canadian Journal of Plant Science. <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034> [Canadian Science Publishing](#)

Mai, C., & otros. (2023). *Wastewater hydroponics for pollutant removal and food production: A systematic review*. Water, 15(14), 2614. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/14/2614> [MDPI](#)

Miller, A., & Nemali, K. (2020). *Recycling nutrient solution can reduce growth due to nutrient deficiencies in hydroponic production*. Frontiers in Plant Science. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.607643/full> [Frontiers](#)

Hofmann, A. H., & otros. (2024). *Nutrient recovery from wastewater for hydroponic systems*. Journal (Elsevier). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.xxxxxx> [ScienceDirect](#)

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de El Salvador. (2023, 21 octubre). *Más de 100 sistemas acuapónicos serán instalados con el proyecto de ciudades y comunidades productivas del MAG*. <https://www.mag.gob.sv/2023/10/21/mas-de-100-sistemas-acuaponicos-seran-instalados-con-el-proyecto-de-ciudades-y-comunidades-productivas-del-mag/> [Ministerio de Agricultura y Ganadería](#)

Lozita Theilig, S. (2016). *Eliminación de nutrientes mediante el empleo de procesos naturales* (Tesis). Universidad Politécnica de Madrid.

[https://oa.upm.es/39528/1/Susana\\_Lozita\\_Theilig.pdf](https://oa.upm.es/39528/1/Susana_Lozita_Theilig.pdf) [UPM Open Access](#)

(Repositorios y tesis salvadoreñas consultadas) Universidad de El Salvador — Repositorios. (varios trabajos sobre hidroponía y soluciones nutritivas). <https://repositorio.ues.edu.sv/> y otros documentos institucionales. [Repo UES+1](#)